

分类号:
学号: 20232510002

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于 SWAT 模型的甘河子河流域径流模拟研究

学位申请人	柴文光
指导教师	杨广 教授 贾伟康 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	水利工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

分类号：
学 号：20232510002

密 级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



基于 SWAT 模型的甘河子河流域径流模拟研究

学 位 申 请 人	柴文光
指 导 教 师	杨 广 教授 贾伟康 高级工程师
申 请 学 位 类 别	专业硕士
专 业 名 称	土木水利
研 究 领 域	水利工程
所 在 学 院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

**A Study on Runoff Simulation in the Ganhezi River Basin Based on
the SWAT Model**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Civil and Hydraulic Engineering

By

Chai Wen-guang

(Hydraulic Engineering)

Dissertation Supervisor: Yang Guang

May,2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：柴文光

时间：2026年5月18日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：柴文光

时间：2026年5月18日

导师签名：李宁

时间：2026年5月18日

摘要

目的: 天山山脉作为中亚水塔和生态保障, 是新疆许多河流发源地, 冰川融水占新疆径流的重要比例, 滋养着下游农业与绿洲, 其中甘河子河作为天山东段的一条季节性干枯河流, 降水和融雪水是甘河子河流域径流的主要补给来源, 但近年来环境变化对区域水资源时空分配产生影响, 研究区位于西北高寒山区, 气象等实测数据缺失成为制约研究区域径流变化难题。在此背景下, 选择适用性好的气象数据集和水文模型用来开展对甘河子河流域径流模拟研究, 可为流域水资源径流预测和自然灾害防范提供一定技术支撑。

方法: 基于甘河子河流域周围实测气象站点提取流域内虚拟站点的气象信息和再分析数据集, 对水文气象周期性、突变性等时空演变规律运用小波分析、Mann-Kendall 检验等方法进行分析研究。运用下垫面数据、气象数据等作为 SWAT 模型输入数据, 基于水量平衡原理构建研究区径流模拟 SWAT 模型。结合不同气象数据集和设置气候因子梯度驱动 SWAT 模型, 探究径流变化对降水、气温等气候因子变化响应。本文主要研究结果如下:

结果: (1) 甘河子河流域水文气象时空分布规律特征明显。甘河子河流域年径流量呈现不显著增加趋势, 年径流量在研究年内发生多次突变, 在研究段时间序列内存在 4 个震荡周期。降水量呈现南多北少分布格局, 年内降水主要集中在 4-9 月, 流域内三个站点年降水均存在不显著变化, 存在 5-10 a 周期变化规律, 其周期震荡特征比较显著。年均气温呈由南向北逐渐递增分布格局, 多年平均气温在 1-5 °C, 三个气象站点年均温也存在不显著变化, 存在 13-15 a、19-21 a 时间尺度下周期变化。

(2) 结合 DEM 高程数据、土地利用数据等下垫面数据和 CMADS 气象数据集, 完成甘河子河流域径流模拟分布式水文模型构建。运用 SWAT-CUP 进行参数敏感性分析并对模型模拟效果选用决定系数、纳什系数、相对均方根误差进行评价, 选择相应评价指标判断模型模拟精度, 率定期、验证期决定系数 (R^2) 分别为 0.83、0.79; 纳什系数 (NSE) 分别为 0.77、0.74; 相对均方根误差 (RSR) 分别为 0.46、0.51, 率定期和验证期模拟结果均符合评价指标要求, SWAT 模型对高寒山区径流模拟具有一定的适用性。

(3) 基于 Copula 函数对误差值修正下, 反距离权重 (IDW) 插值气象数据集模拟效果优于 CMADS、克里金插值气象数据集。利用 Copula 函数建立对径流模拟值和误差值联合密度分布函数, 进一步提升了径流模拟精度。CMADS 驱动下模拟精度在率定期 R^2 、NSE、RSR 分别提高了 11%、12.7%、26%、验证期内提高了 15%、16%、4%。克里金插值气象数据驱动模拟精度在率定期 R^2 、NSE 提高了 12.8%、13%, RSR 精度降低了 8%、验证期内提高了 23%、21%、5%。IDW 插值气象数据驱动下模拟精度在率定期 R^2 、NSE、RSR 分别提高了 16.7%、18%、60%、验证期内提高了 18%、17%、67%。研究表明 IDW 插值气象数据模拟效果最好, CMADS 模拟效果次之, 克里金插值数据模拟效果最低。

(4) 研究气候因子变化对径流模拟影响，径流量对降水变化的敏感度要大于气温。保持其余气候因子不变，降水量增加 10%时径流量增加 14.78%，气温增加 2 °C，径流量减少 2.98%。径流变化对多因子气候变化情景下更加敏感，以基准年降水为基础减少 10%，温度升高 2 °C时，径流量下降率为 15.8%，年均径流减少了 0.16 m³/s。气候梯度设置为降水增加 10%，温度减少 2 °C，径流量增加最显著，径流量增长率为 17.9%，年均径流增加了 0.18 m³/s。

结论：甘河子河流域年径流呈现增长趋势，降水、气温空间分布差异性显著，年内季节性变化明显。分布式水文模型对研究甘河子河流域径流有一定适用性，运用 Copula 函数修正因子显著提高了模型精度，径流模拟变化对降水因子响应敏感度要高于气温因子。

关键词：甘河子河流域；SWAT 模型；径流模拟；Copula 函数；气候变化

Abstract

Objective: As the “water tower” and ecological safeguard of Central Asia, the Tianshan Mountains are the source of many rivers in Xinjiang. Glacial meltwater accounts for a significant proportion of Xinjiang’s runoff, nourishing downstream agriculture and oases. Among these, the Ganhezi River, a seasonally dry river in the eastern Tianshan Mountains, relies primarily on precipitation and snowmelt as the main sources of runoff in its basin. However, environmental changes in recent years have impacted the spatiotemporal distribution of regional water resources. Located in the high-altitude, cold mountainous regions of Northwest China, the study area faces challenges in researching runoff changes due to a lack of observed meteorological and other data. Against this backdrop, selecting suitable meteorological datasets and hydrological models to conduct runoff simulation studies in the Ganhezi River basin can provide technical support for runoff forecasting and natural disaster prevention in the basin.

Methods: Based on meteorological data from actual weather stations surrounding the Ganhezi River basin and reanalysis datasets, this study analyzes the spatiotemporal patterns of hydrometeorological phenomena—including periodicity and abrupt changes—using methods such as wavelet analysis and the Mann-Kendall test. Using land surface data and meteorological data as input for the SWAT model, a SWAT model for simulating runoff in the study area was constructed based on the principle of water balance. By combining different meteorological datasets and setting climate factor gradients to drive the SWAT model, this study investigated how runoff variations respond to changes in climate factors such as precipitation and air temperature. The main findings of this study are as follows:

Results: (1) The Ganhezi River basin exhibits distinct patterns in the spatiotemporal distribution of hydrometeorological conditions. Annual runoff in the basin shows no significant upward trend, but experienced multiple abrupt changes during the study period, with four oscillation cycles observed in the time series. Precipitation exhibits a pattern of higher amounts in the south and lower amounts in the north, with annual precipitation primarily concentrated between April and September. Annual precipitation at the three stations within the basin shows no significant changes, but exhibits a 5–10-year cyclical variation pattern, with relatively pronounced cyclical oscillation characteristics. Annual mean temperatures exhibit a distribution pattern that gradually increases from south to north, with a long-term average ranging from 1 to 5°C. Annual mean temperatures at the three meteorological stations also show no significant changes, exhibiting periodic variations on 13–15-year and 19–21-year timescales.

(2) By integrating surface data—including DEM elevation data and land use data—with the CMADS meteorological dataset, a distributed hydrological model for simulating runoff in the Ganhezi River basin was successfully developed. Parameter sensitivity analysis was conducted using SWAT-CUP, and the model’s simulation performance was evaluated using the coefficient of determination, Nash coefficient, and relative

root mean square error. Appropriate evaluation metrics were selected to assess the model's simulation accuracy. The coefficients of determination (R^2) for the calibration and validation periods were 0.83 and 0.79, respectively; the Nash coefficients (NSE) were 0.77 and 0.74, respectively; and the relative standard root mean square error (RSR) were 0.46 and 0.51, respectively. The simulation results for both the calibration and validation periods met the evaluation criteria, indicating that the SWAT model is suitable for simulating runoff in high-altitude cold regions.

(3) When error values are corrected using Copula functions, the simulation results of the inverse distance weighting (IDW) interpolated meteorological dataset outperform those of the CMADS and Kriging interpolated meteorological datasets. By using Copula functions to establish a joint density distribution function for simulated runoff values and error values, the accuracy of runoff simulation is further improved. Simulation accuracy driven by CMADS improved by 11%, 12.7%, and 26% for R^2 , NSE, and RSR, respectively, during the training period, and by 15%, 16%, and 4% during the validation period. Simulation accuracy driven by Kriging-interpolated meteorological data improved by 12.8% and 13% for R^2 and NSE, respectively, during the training period, while RSR accuracy decreased by 8%; during the validation period, it improved by 23%, 21%, and 5%, respectively. For simulations driven by IDW-interpolated meteorological data, the accuracy of R^2 , NSE, and RSR during the calibration period increased by 16.7%, 18%, and 60%, respectively, and by 18%, 17%, and 67% during the validation period. The study indicates that simulations using IDW-interpolated meteorological data yielded the best results, followed by those using CMADS, while simulations using Kriging-interpolated data performed the worst.

(4) This study examines the impact of changes in climatic factors on runoff simulation. runoff is more sensitive to changes in precipitation than to changes in temperature. Holding other climatic factors constant, a 10% increase in precipitation resulted in a 14.78% increase in runoff, while a 2 °C rise in temperature led to a 2.98% decrease in runoff. Runoff is more sensitive to multi-factor climate change scenarios; when precipitation was reduced by 10% relative to the base year and temperature increased by 2 °C, the runoff decline rate was 15.8%, and the annual average runoff decreased by 0.16 m³/s. When the climate gradient is set to a 10% increase in precipitation and a 2 °C decrease in temperature, the increase in runoff is most significant, with a growth rate of 17.9% and an increase in annual average runoff of 0.18 m³/s.

Conclusion: Annual runoff in the Ganhezi River basin shows an upward trend, with significant spatial variations in precipitation and temperature, as well as pronounced seasonal variations throughout the year. Distributed hydrological models are suitable for studying runoff in the Ganhezi River basin; the use of Copula correction factors has significantly improved model accuracy, and the sensitivity of simulated runoff variations to precipitation factors is higher than that to temperature factors.

Key words: Ganhezi River basin; SWAT model; runoff simulation; Copula function; climate change

目录

摘要.....	I
Abstract	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	2
1.2.1 水文模型研究进展	2
1.2.2 SWAT 模型研究进展.....	3
1.2.3 大气再分析数据集研究进展	3
1.2.4 气候变化对径流量影响研究	4
1.3 研究内容.....	5
1.3.1 研究目标	5
1.3.2 研究内容	6
1.4 论文章节安排.....	6
第 2 章 研究区概况及 SWAT 模型简介.....	8
2.1 地理位置.....	8
2.2 地形地貌.....	9
2.3 河流水系.....	9
2.4 气候特征.....	9
2.5 SWAT 模型简介	9
2.5.1 模型原理	9
2.5.2 模型结构	10
2.6 小结.....	12
第 3 章 甘河子河流域水文气象规律分析	13
3.1 研究方法与气象数据处理.....	13
3.1.1 研究方法	13
3.1.2 气象数据处理	16
3.2 甘河子河流域径流规律演变特征.....	19
3.2.1 时间变化趋势	19
3.2.2 周期变化	21

3.3 甘河子河流域降水规律演变特征.....	21
3.3.1 空间演变特征	21
3.3.2 时间演变特征	23
3.3.3 周期变化	24
3.4 甘河子河流域气温规律演变特征.....	26
3.4.1 空间演变特征	26
3.4.2 时间演变特征	27
3.4.3 周期变化	28
3.5 小结.....	30
第4章 甘河子河流域 SWAT 模型构建.....	32
4.1 SWAT 模型输入数据来源与处理	32
4.1.1 DEM 高程数据	32
4.1.2 土地利用数据	33
4.1.3 土壤数据	33
4.1.4 气象数据	35
4.2 再分析数据集适用性评价.....	36
4.3 SWAT 模型构建	38
4.4 SWAT 模型参数率定与适用性评价	40
4.4.1 参数敏感性分析与率定	40
4.4.2 模型适用性评价	42
4.5 模型模拟结果.....	42
4.6 小结.....	43
第5章 气候变化对甘河子河流域径流量变化影响.....	45
5.1 不同气象数据集对径流模拟结果影响.....	45
5.1.1 气象数据集构成	45
5.1.2 不同数据集径流模拟结果	46
5.2 基于 Copula 函数对径流模拟误差值修正	48
5.2.1 Copula 函数表达式.....	48
5.2.2 Copula 函数误差修正方法.....	49
5.2.3 基于 Copula 函数对径流模拟修正.....	49
5.3 气候因子变化对径流模拟结果影响.....	53
5.3.1 气候情景设定	54
5.3.2 单一气候因子对径流影响	54
5.3.3 多因子气候变化对径流影响	55

5.4 小结.....	57
第 6 章 结论与展望.....	59
6.1 结论.....	59
6.2 展望.....	60
参考文献.....	61
致谢.....	68
作者简介.....	69

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

径流是水循环和水资源评价的重要因素^[1]，其中降水是径流的主要补给来源。降水对径流形成过程研究是水文学的主要任务之一，通过降水、下渗等一系列水文过程影响流域产汇流、水循环等过程^[2]。径流模拟研究为解决其它水文问题提供了参考，径流模拟是水文模型中的一种重要技术，用于预测降水、土壤水分和地表水流动的过程^[3]。寒区水文是水文学的重要组成部分，其过程复杂多变。受到下垫面条件等因素影响，寒区水文过程诸要素的时空差异性也增加了寒区水文复杂性。全国多年冻土约占陆地总面积的四分之一，寒区分布更为广泛。中国寒区包括所有的多年冻土区、冰川区和绝大多数稳定性季节积雪区。我国寒冷地区面积为 $417.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占我国陆地面积 43.5%^[4,5]。寒区冰川积雪融化以及土壤冻融过程都会影响水循环过程，融雪期土壤下渗对于融雪产流有重要意义。寒区自然环境恶劣，受地形、气候等因素影响，气象站点稀少，观测资料存在缺失，对于寒区水文研究具有不确定性^[6]。寒区水文过程因其特殊性、复杂性和不确定性，对寒区径流过程的研究也更为困难。

分布式水文模型是一种用于分析和预测水文过程的工具^[7]，分布式水文模型自上世纪 60 年代以来发展迅速。随着人口增长和经济发展，水资源的需求日益增加，传统的水文模型往往无法准确反映复杂的自然过程，分布式水文模型通过考虑地理、气候和人类活动的影响，更加精确地进行水资源评估和管理。GIS 技术的进步使得分布式模型得以在空间上更好地处理数据，能够高效地模拟微观过程并进行空间分析，提高了水文模型的准确性和应用范围。遥感等技术的快速发展，推动了水文数据的实时获取和处理，使得分布式模型能够利用丰富的数据源进行细致的水文分析。SWAT 模型作为成熟度较高的一种分布式水文模型，在研究气候变化对径流模拟影响方面得到广泛应用，取得了显著成果^[8]。SWAT 模型以水文响应单元 HRU 为基本单元，运用达西定律、水文学方程以及经验公式等模拟水流运动规律。在寒区，尤其是冰雪融水依赖度高的地区，SWAT 模型为研究水资源分配和管理提供了科学依据。通过模拟不同水资源管理方案，帮助决策者制定合理的水资源管理计划。在全球变暖下的趋势下，河流径流量变化显著，突发性水文事件发生频率加大^[9]。运用分布式水文模型研究西北地区干旱区河川径流的变化特征，对于掌握西北地区的径流变化规律，合理配置农业用水和生态需水，预防洪水极端事件发生有重要意义。

甘河子河流域是位于新疆阜康市境内的小流域，生态环境较为恶劣。在融雪和暴雨

双重作用下,以及流域面积不大的特点,使得形成洪水具有峰高量大且峰现时间短的特点^[10]。历史上土墩子农场多次遭遇持续融雪暴雨性洪水袭击。洪涝灾害、干旱缺水等水问题严重阻碍了社会经济的发展,为充分利用水资源,在低水低用、高水高用、近水近用,以需定供和以供定需相结合等原则下,新建甘河子河水库解决甘河子河灌区农业灌溉季节性缺水问题以及工业发展等用水问题,为提升灌区水资源有效利用、生态环境保护等发挥重要作用^[11]。甘河子河流域地处偏远山区,自然环境恶劣,气象站点稀少,搜集数据资料较为困难,缺乏相关数据,使得对研究该流域径流变化过程存在一定困难。因此选用适用性强的水文模型开展对研究流域径流模拟,可为流域水资源径流预测和自然灾害防范提供一定技术支撑。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水文模型研究进展

水文模型发展为解决自然界复杂水文问题应运而生,是水文研究的重点之一。近几十年以来,随着全球气候变暖,引起的一系列水灾水害,进而气候变化对水文循环过程和水资源的影响日益得到世界范围内学术界的广泛关注,并逐渐成为水文学研究中的热点问题。水文模型是对水运动过程的模拟,是探究水文规律变化的一种应用工具。从 17 世纪的推理公式起,水文模型经历了从集总式到分布式水文模型发展,涌现出许多概念性水文模型。20 世纪 60 年代,随着达西定律、入渗方程、蒸发公式以及经验公式等理论的产生,有关水文这一概念和理论不断完善,涌现了许多经验型的“黑箱”模型,20 世纪 60~80 年代,集总式“灰箱”模型快速发展^[12]。国外众多水文模型中,最具代表性模型有 Stanford 模型、TANK 模型、SCS 模型分布式流域水文模型等。水文模型经历了从集总式到分布式发展,第一个集总式模型水箱(TANK)模型是在 1961 年由日本研制的^[13]。我国有新安江蓄满产流模型和陕北超渗产流模型^[14]。新安江模型是由赵人俊教授团队 1973 年对新安江入库流量预报工作时提出来的降雨径流流域模型,简称新安江模型^[15,16]。分布式水文模型是将大流域离散化处理分成小单元,在小单元基础上进行运算,运用水文学物理机制和经验公式模拟水文运动规律,其揭示的水文循环运用过程更加接近客观世界,是水文模型发展的必然趋势^[17]。分布式水文模型的研究可以起始于 1969 年 Freeze^[18,19]和 Harlan^[20]发表的《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》的文章,1975 年 Hewlett 和 Troenale^[21]以该文章为基础,真正实现了对初代分布式水文模型的构造^[22]。20 世纪 90 年代后,随着计算机技术、“3s”技术的快速发展及其在水文学上的应用^[23],分布式水文模型获得了长足的发展。21 世纪初,国际水文科学协会(IAHS)提出了未来 10 年关于水文学研究计划。分布式水文模型能够结合空间和时间变化,把

针对单一水量变化扩大到多种水文要素变化研究中，并对生态问题也进行了一定考量。它将流域划分成许许多多的网格单元，由各网格单元的降雨和蒸发作模型输入，产汇流也立足于网格单元的水文物理特性，以各网格单元为计算基础，结合流域空间特性和下垫面情况采用河道计算公式进行产汇流计算，以此求得流域出口径流量。水文模型在水文预报、流域规划、城市的防洪规划等领域提供参考价值。

1.2.2 SWAT 模型研究进展

SWAT(Soil and water assessment tool)是美国农业部(United States Department of Agriculture,USDA)农业研究中心(Agriculture Research Service,ARS)ARNOLD 等开发的分布式流域水文模型^[24-26]。SWAT 模型是经典的分布式水文模型，SWAT 模型由 SWRRB 模型基础上发展起来，SWRRB 模型起源于 CREAMS 的日降水水文模型^[27]，加入了 EPIC 植物生长模块，20 世纪 80 年代末，为了用于水质评估，SWRRB 模型引进了 GLEAMS 模型的杀虫剂模块。但是 SWRRB 模型最多只能划分为 10 个子流域，无河道循环过程。ROTO 模型提供了河道演算法，将 SWRRB 模型和 ROTO 模型整合，形成一个单独的模型 SWAT 模型^[28,29]。经过三十多年的发展研究，SWAT 模型已成为了一部非常成熟水文模型软件，是基于水量平衡原理，以流域水文气象要素、下垫面等要素为模型驱动数据来描述研究区径流变化过程。该模型根据出水口位置将研究区划分为若干个子流域^[30]，径流从一个子流域流向另一个子流域^[31]。Goldstein 等^[32]基于 SWAT 模型探讨美国新泽西州 Jordan 河流土地利用类型演变与气候要素之间的耦合关系。Bekiaris 等^[33]在瑞典西南部 Ronnea 流域的应用表明，SWAT 模型对面积约 250 km²的流域进行年尺度和月尺度径流模拟时效果最佳。Bormann 等^[34]对比分析不同流域模型对土地利用变化的响应敏感性后发现，SWAT 模型更适用于中型水库的水文模拟研究。

国内 SWAT 模型研究兴起于 2000 年，在研究初期国内学者针对于不同流域运用 SWAT 模型，并尝试将该模型运用西北高寒山区，验证 SWAT 模型在复杂气候条件下适用性。黑河流域^[35]、黄河流域^[36]、玛纳斯河流域^[37]、淮河流域^[38]等多个流域进行径流模拟，验证 SWAT 模型在我国不同流域、不同下垫面条件下的适用性。可以对不同土壤条件、土地利用类型、气候情景以及人类活动影响下的径流等进行有效模拟^[39]，SWAT 的优点包括输入数据容易获取、计算效率高。具有较强的物理基础，能够在缺乏资料的地区建模。

1.2.3 大气再分析数据集研究进展

气象数据作为水文模型的主要输入，其时间序列完整性会直接影响到模型的精度，某些研究流域由于海拔、地形、气候等条件限制，导致气象站点稀缺且分布不均，无法

获得气象数据或者气象数据缺失,破坏了时间序列的连续性。在数据缺失情况下首先选用空间插值方法和再分析数据集构建研究区气象数据库。利用实测气象站点观测数据运用空间插值技术进行降尺度处理,如反距离权重(IDW)、克里金插值法等。大气再分析数据集数据分辨率满足水文模型需要且数据具有连续性,在实测数据缺失条件下采用大气再分析数据解决了模型缺少气象数据驱动的难题。大气再分析数据集是由气象站点实测数据、遥感卫星数据和数值预报模式再结合的气候模式^[40]。国际上使用较为广泛的再分析数据集主要有美国 NCEP 系列^[41][Climate Forecast System Reanalysis(CFSR)、National Center for Atmospheric Research(NCAR)],日本气象厅 JRA 系列^[42]、欧洲中期天气预报中心 EAR 系列^[43]以及中国大气同化数据集 CMADS^[44]等。孟现勇等^[45]使用 CMADS、CFSR、TWS 再分析数据以黑河为研究流域驱动 SWAT 模型,结果表明使用 CMADS+SWAT 模式再分析数据的径流模拟适用性更强且 CMADS 数据集可以很好的体现高寒地区黑河流域的下垫面地表大气特征。Jun 等^[46]运用 CMADS 和 CFSR 的气候要素与气象站的观测值模拟水文过程,研究表明 CMADS 数据集较传统传气象站驱动大中尺度水文模型拥有更明显的优势。谷新晨^[47]等使用 CMADS+SWAT 模式对玛纳斯河流域进行水文模拟,表明 CMADS 驱动 SWAT 模型能够在月尺度较好地模拟流域水文过程。骆成彦等^[48]利用中国气象同化驱动数据集驱动 SWAT 模型对玉龙喀什河流域径流模拟具有良好的适用性,CMADS+SWAT 模式对高寒山区的水文模拟有很好的适用性。王丽霞等^[49]通过对比分析对中国大气同化数据集和传统气象站实测数据进行相关性研究,运用数据集和实测两种数据驱动 SWAT 模型,研究表明 CMADS 驱动模型结果要优于实测数据,可为气象资料匮乏地区构建 SWAT 水文模型提供数据支撑。精准度高的气象数据对于区域及全球的水资源管理、水文事件预测、水文过程模拟等方面起着至关重要的作用^[50]。在实测站点数据匮乏的情况下,CMADS 可以为研究流域的流量提供高质量的气象数据。

1.2.4 气候变化对径流量影响研究

气候变化导致全球水循环受到巨大影响,极端水文事件发生概率增大。全球气候变暖正在持续并引发一系列问题,温度持续攀升、海洋变暖加速。降水、气温等气候因素与水文过程息息相关。

Stonefelt 等^[51]的研究表明,流域径流对气候变化的响应特征因水文气候要素变化而异,各要素通过复杂的非线性耦合机制产生差异化影响。Ficklin 等^[52]采用 SWAT 模型,综合考虑大气 CO₂浓度、气温及降水等关键气候因子系统评估了未来气候变化情景下研究流域水文过程的响应特征,结果表明该流域对气候变化敏感度较高。Somura 等^[53]通过解析气候变化对流域水资源的影响机制,量化了不同气候情景下蒸散发、积雪量及径流输出的演变趋势,为当地未来水资源储备策略制定提供科学依据。Marin M 等^[54]利用

SWAT 模型评估气候变化背景下森林小流域水资源的脆弱性, 研究表明地表径流呈下降趋势, 最高可达 41%。Jha 等^[55]应用 SWAT 模型, 研究了密西西比河上游流域河川流量对气候变化的敏感性。Franczyk 等^[56]应用 SWAT 模型模拟了流域气候变化情景下径流深度的变化。

根据全球和中国的气候模式的预估结果, 预计到 2050 年全国年平均气温将上升 2.3 °C~3.3 °C, 年平均降雨增加 5%~7%, 到 2100 年全国年平均气温将上升 3.9 °C~6.0 °C, 年平均降雨增加 11%~17%^[57], 气候变化情景主要考虑气温和降水的变化。王怀志等^[58]采用任意假设法对气候变化情景进行设置, 利用秦淮河流域 SWAT 模型模拟 48 种气候变化情景下的水文过程, 结果表明降雨量增加或气温降低都会引起径流量增加, 径流对降雨量变化的响应更为强烈。Leng Guoyong 等^[59]以 RCP8.5 排放情景下 5 种 GCMs 为驱动, 结合水文模型研究气候变化对中国气象、农业、水文干旱的影响。朱利等^[60]基于 SWAT 模型内置的天气发生器构建 25 组气候情景, 在月尺度上系统解析了汉江流域降水与气温变化对径流过程的驱动效应及其影响阈值。尹雄锐等^[61]对洮儿河流域的研究表明, 各季节及年平均气温大多数以显著增温为主, 而流域降水微弱增加, 总体变化趋势不显著, 未通过显著性检验。屈吉鸿等^[62]为探讨气候变化对径流影响, 以青龙河流域的水文数据, 建立 SWAT 流域水文模型。降水量和气温的变化影响径流过程。降水的影响是该流域水资源变化的主要因素。寇丽敏等^[63]基于 SWAT 模型研究气候变化对洮儿河流域水文变化影响, 得出未来情景下, 洮儿河的径流量相对于基准期而言, 总体变化不明显, 未来 10 年、20 年稍有增加, 未来 30 年又有减少趋势。张利平等^[64]利用 SWAT 模型定量区分了气候因素与人类活动对永定河流域径流变化的贡献, 结果显示 20 世纪 80 年代后期径流衰减的主导驱动为气候变化, 其贡献率约为 65.4%。

综上所述, SWAT 模型作为分布式水文模型的代表, 不少学者运用 SWAT 水文分布模型进行径流模拟。SWAT 模型在模拟和预测气候变化对流域径流影响方面发挥了重要作用, 降水模式、气温的升高、冰川融化等因素共同作用于水循环过程, 导致不同地区 and 不同流域的径流年内分配和总量发生变化。气候变化对径流的影响是复杂且多维的, 需要综合考虑多种因素, 并利用水文模型进行评估。

1.3 研究内容

1.3.1 研究目标

本研究以甘河子河流域为研究对象, 分析研究区气象水文要素趋势性及突变性。基于水量平衡原理构建 SWAT 模型进行径流模拟, 运用 CMADS 数据集和实测插值气象数据集作为气象数据输入驱动 SWAT。利用 SWAT-CUP 软件进行敏感性分析以及参数率